第 39 卷 第 4 期
2021 年 12 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 39, No. 4
Dec., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.04.02

宇宙黎明和再电离时期探测进展

赵碧轩[1]，郑 倩[1,2]，张泽康[1,3]，郭 铨[1,2]，陕欢源[1,2,3]

(1.中国科学院 上海天文台，上海 200030； 2.中国科学院射电天文重点实验室，南京 210033； 3.中国科学院大学，北京 100049)

摘要： 宇宙黎明和再电离信号探测是目前运行以及即将建成的低频射电阵列 (如平方公里阵列 square kilometer array, SKA) 的首要科学目标之一。红移 $z = 6 \sim 27$ 时期的 HI 超精细能级跃迁产生的 21 cm 辐射是进行宇宙黎明和再电离时期探测的最直接而有效的工具，通过探测 HI 的 21 cm 信号可以描绘出宇宙第一代发光天体的产生和形成过程，从而研究宇宙从黑暗走向光明的历史。主要介绍近年来宇宙黎明和再电离探测方向的相关研究进展，讨论了在宇宙黎明和再电离探测时期探测中关于前景去除、数据处理方法等相关问题，以及低频射电望远镜在全天总功率测量、功率谱测量方面的研究进展。

关 键 词： 宇宙学；宇宙黎明和再电离时期探测；射电干涉阵列

中图分类号： P159, P161 **文献标识码：** A

1 引 言

宇宙大爆炸以后，当宇宙年龄为 38 万年时，原子核与电子复合成为 HI 原子，光子得以自由地运动，从而形成了宇宙背景辐射。之后宇宙进入了漫长的黑暗时期[1]，直到第一代发光天体形成。宇宙第一代恒星和星系开始形成，它们发出的紫外光辐射电离了周围的 HI，使得整个宇宙开始明亮起来，宇宙进入黎明和再电离时期。HI 21 cm 信号是探测宇宙黎明和再电离时期的最直接、效率最高的工具。宇宙黎明和再电离时期的 21 cm 信号红移到今天的波长范围属于米波波段，因此可以通过射电望远镜在低频射电波段进行探测。目前通过 HI 21 cm 信号对宇宙黎明和再电离时期探测可以通过 21 cm 信号层析的方法，这种方法主要是以宇宙微波背景辐射为背景辐射源，通过探测 CMB (cosmic microwave background，宇宙微波背景) 亮温度的改变[2]，得到再电离信号，获得星系际介质的三维演化图像。除了

收稿日期： 2021-03-07； **修回日期：** 2021-05-08

资助项目： SKA专项 (2020SKA0110100)；国家重点研发计划 (2018YFA0404601)；国家自然科学基金 (10973069, 10973070)；中科院基础前沿科学研究计划从 0 到 1 原始创新项目 (ZDBS-LY-7013)；上海市浦江人才计划 (19PJ1410700, 19PJ1410800)

通讯作者： 赵碧轩，zhaobixuan@shao.ac.cn

层析方法以外，另一种方法是“21 cm 森林”观测，这种观测是以高红移 (红移 6 以上) 的类星体或伽马暴余辉等一些非常强的射电源作为背景辐射源，探测视线方向上的 HI 在它们各自的光谱上产生的吸收线信号[3, 4]。不同红移的结构在类星体光谱的不同频率处产生吸收线，形成“森林”似的光谱结构。不同于 21 cm 层析方法的是，21 cm 森林信号更加敏感于星系际介质的温度，能够更有效地提取宇宙温度演化的信息。

正如 Gunn 和 Peterson[5] 所预测的，在两个 $z \approx 6$ 的 QSOs 中检测到中性 IGM (inter galactic matter，星系际物质) 对 Lyα 的吸收，彻底改变了对宇宙再电离时期的理解。21 cm 森林的方法[6–8] 可以提供一些小规模结构的信息，例如作为单个暗物质迷你晕，小质量星系，甚至早期宇宙的 H II 恒星区。通过大规模的数值模拟，Carilli 等人[6] 发现一些高密度区域 Lyα 森林的高红移源在射电噪类星体光谱中产生了可识别的吸收特征，但是他们无法解决最小质量尺度上的气体云坍塌，尽管这些云代表了高红移 IGM 中最丰富的团块。Furlanetto 和 Abraham[7] 通过半解析探索这些紧凑型吸收系统的统计数据，补充了 Carilli 等人[6] 的研究结果。这种半解析方法能够检验结果对输入参数变化的敏感性，可以更好地通过射电吸收光谱测量物理量。Xu 等人[4] 以高红移点源作为背景，计算了单个迷你暗晕和矮星系的吸收信号，包括内部和周围的气体含量。本文主要讨论层析法的进展。

然而，宇宙黎明和再电离时期的 HI 21 cm 信号非常微弱，相对于宇宙微波背景在亮温度上的起伏的最大值只有约 0.01 K[9]，比包含银河系辐射以及河外射电源的前景污染低 4~5 个数量级，因此微弱的宇宙黎明和再电离信号被强大的宇宙前景信号淹没，要将前景污染信号移除到 5 个数量级以下，在目前的低频射电数据处理中还存在困难。另外，在低频射电波段存在着许多人为干扰，如电视基站、手机、广播等通信干扰，在地球上能够建立低频射电望远镜的射电宁静区域非常稀少。总之，在实际探测中存在着诸多困难和挑战，例如前景的识别和去除，高动态大视场成像，校准和电离层改正，仪器效应去除，海量数据处理等。

目前宇宙黎明和再电离时期的探测在研究方法上主要包括三个方向：宇宙黎明和再电离信号的全天总功率测量；宇宙黎明和再电离信号的统计测量，即功率谱测量；直接对再电离区域实施成像观测。在这三个研究方向中，全天总功率测量通过单天线进行观测，宇宙黎明和再电离信号的功率谱测量和成像研究则是基于低频射电干涉阵列的观测来实现的。宇宙黎明和再电离信号的功率谱测量和成像研究是目前运行的和即将建成的低频射电阵列的首要科学目标之一。通过不同红移处的 HI 21 cm 辐射观测，可揭示不同时期宇宙中的 HI 分布，从而描绘出第一代恒星和星系的形成及气体再电离的复杂过程，精确测量宇宙大尺度结构的初期演化，为解决宇宙结构起源等问题提供重要信息和线索。

近年来，为了拨开迷雾看到“宇宙的第一缕曙光”，推进宇宙学研究进入一个新的黄金时代，宇宙黎明和再电离时期探测成为目前国内和国际上的低频观测设备以及即将开始建设的大型射电阵列的首要科学目标之一。进行全天总功率测量的实验主要包括：EDGES (experiment to detect the global eor signature)[10–15], BIGHORNS (broadband instrument for global hydrOgen reioNisation signal)[13], SCI-HI (sonda cosmológica de las islas para la detección de hidrógeno neutro)[16], LEDA (large-aperture experiment to detect the dark ages)[17, 18], SARAS (shaped sntenna measurement of the background radio spectrum)[19–21], DARE (the

proposed dark ages radio explorer)[22, 23], PRI^{Z}M (probing radio intensity at high-Z from marion)[24], ASSASSIN (the all-sky signal short-spacing interferomete)[25], DAPPER (dark ages polarimeter pathfinder)[26] 和 DSL (discovering the sky at the longest wavelengths with small satellite constellations)[27] 等。进行宇宙黎明和再电离时期统计测量的低频射电阵列主要包括：21CMA (21 Centimeter Array)[28, 29], GMRT (Giant Meterwave Radio Telescope)[30], MWA (Murchison Wide-field Array)[31–36], LOFAR (Low Frequency Array)[37, 38], PAPER (Precision Array to Probe Epoch of Reionization)[39, 40] 和 HERA (Hydrogen Epoch of Reionization Array)[41] 等，这些目前已经建成的低频射电阵列是未来即将建成的大型射电阵列 SKA 的探路者阵列。未来的 SKA 在灵敏度和分辨率上的优势将具备对宇宙黎明和再电离时期进行功率谱测量和直接成像研究的能力。本文对近年来宇宙黎明和再电离探测领域的研究进展进行介绍。

本文结构如下：第 2 章概述宇宙黎明和再电离探测在观测和数据处理过程中的相关问题；第 3 章介绍目前低频实验的探测进展；第 4 章给出总结和展望。

2 宇宙黎明和再电离时期探测概述

2.1 21 cm 信号

HI 的 21 cm 辐射是由 HI 超精细能级跃迁产生的。HI 的电子存在着自旋平行和反平行两种状态，当这两种状态发生转换时，便发生了超精细能级间的跃迁，产生了波长为 21 cm 的辐射。因为 HI 发生自发超精细能级跃迁的概率非常小，对于 1 个 H 原子而言，发生一次自发跃迁需要的时间是大约 1 000 万年。第一代发光天体辐射出的光子加热 HI，使其周围的 HI 发生了超精细能级跃迁。

HI 的 21 cm 线是一条具有特定频率的谱线，在不同的探测波段对应于不同红移时期的 HI 信号。随着宇宙的膨胀，宇宙黎明和再电离时期的 HI 21 cm 信号传播到今天的波长范围属于米波波段，也就是低频射电波段。因此，可以在低频射电波段通过探测 HI 21 cm 信号来研究第一代发光天体的形成，从而研究宇宙的黎明和再电离时期。HI 超精细能级跃迁产生的 21 cm 信号，可以通过亮温度 $T_{\rm b}$ 来描述，表示为[2]：

$$\delta T_{\rm b}(\boldsymbol{r},z)=T_0(z)[1+\delta_{\rm m}(\boldsymbol{r})][1-x_i(\boldsymbol{r})]\quad , \tag{1}$$

其中，$\delta_{\rm m}$ 是物质密度，x_i 是气体的电离度 ($x_i=1$ 表示气体完全电离，$x_i=0$ 表示气体是完全中性的)，$T_0(z)$ 表示为：

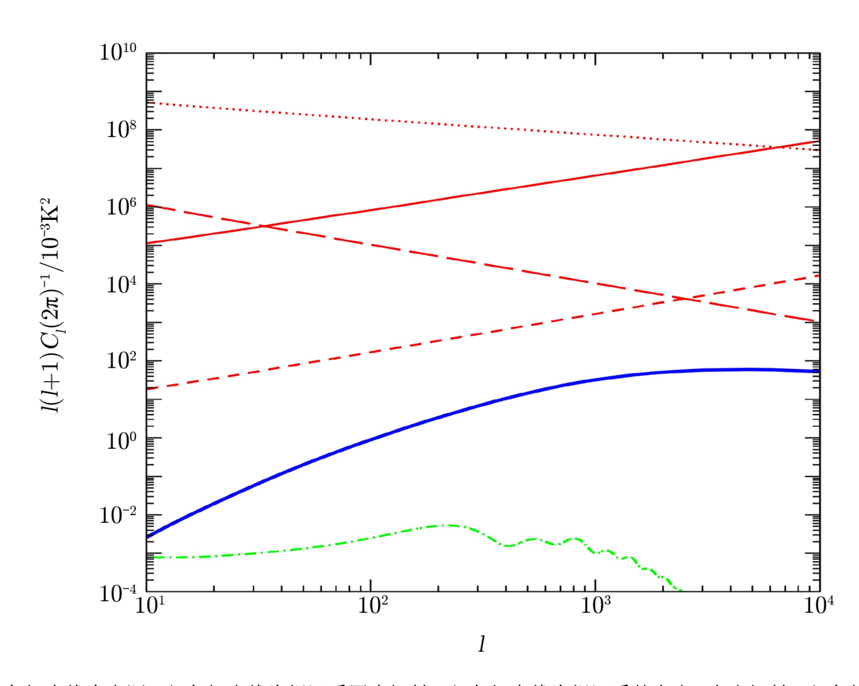
$$T_0(z)=26\left(\frac{T_{\rm S}-T_\gamma}{T_{\rm S}}\right)\left(\frac{\Omega_{\rm b}h^2}{0.022}\right)\times\left[\left(\frac{0.143}{\Omega_{\rm m}h^2}\right)\left(\frac{1+z}{10}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\quad , \tag{2}$$

其中，$T_{\rm S}$ 是 HI 的自旋温度，T_γ 是 CMB 的温度，h 是普朗克常数，$\Omega_{\rm b}$ 是重子密度，$\Omega_{\rm m}$ 是总物质密度，z 是红移。假设 $T_{\rm S}$ 在整个 IGM 中都与气体温度 $T_{\rm gas}$ 耦合，并且气体温度远大于 CMB 温度。一旦建立了充分的 Lyα 背景以将自旋温度与气体温度耦合，并且早期 X 射

线或其他来源提供了所需的热量，该假设便成立。当 HI 的自旋温度高于宇宙微波背景辐射的亮温度时，会产生 21 cm 发射信号；当 HI 原子的自旋温度低于宇宙微波背景辐射的亮温度时，则会产生 21 cm 吸收信号。因此可以通过探测相对于宇宙微波背景辐射亮温度上的起伏来探测 HI 的发射和吸收信号。

2.2 射电前景去除

在利用 HI 21 cm 谱线重构宇宙演化史的过程中，提取宇宙黎明和再电离信号的关键问题之一就在于能否准确地扣除银河系和银河系外的射电前景污染。前景主要包括射电晕、银河系同步辐射、银河系自由-自由辐射、银河系外射电源。在各种污染性前景成分中，银河弥漫辐射 (包括同步辐射和自由-自由辐射) 和银河系外点源是主要污染成分[9, 43, 44]，据估计，在约 150 MHz 时，它们可能分别约占前景污染总量的 71% 和 27%[43]。近年来，国际上在前景扣除方面开展了大量研究，目前对于前景去除通常使用的方法基于射电前景谱在频率空间平滑性的假设，通过使用光滑函数[45]、多项式拟合[46]、主成分分析 (PCA)[47]、奇异值分解 (SVD)[48]、K-L 变换[49]等方法在频率空间进行射电前景的拟合和去除。然而，由于背景信号比前景低 5 个数量级 (如图 1 所示)，因此将前景通过拟合精确扣除到 5 个数量级以下还存在着困难。并且，由于仪器系统误差的存在，在观测过程中前景辐射的极化成分可能会泄露到非极化的 21 cm 信号，增益在频域的变化等都会影响前景去除的精度，从而为提取宇宙黎明和再电离信号造成困难。



注：红色细实线为点源，红色细点线为银河系同步辐射，红色细虚线为银河系外自由- 自由辐射，红色细长虚线为银河系自由-自由辐射，CMB 用绿色的点划线表示。

图 1 $z = 9.2$ ($\nu = 140$ MHz) 时的 21 cm 信号功率谱 (蓝色粗线) 及各前景成分功率谱[42]

前景污染中，源于银河系的污染包括银河系的同步辐射和自由-自由辐射，比宇宙再电离背景信号高 5 个数量级。由于在频率空间认为银河系的辐射谱是平滑的，因此可以通过拟合平滑函数的方法来进行扣除。河外射电源是前景污染的主要成分之一，其中形状规则的点源可以通过高斯函数拟合等方法进行扣除，但是具有大尺度弥散结构的展源却是前景去除中的难点。前景污染中弥散辐射的成分主要包括在低频射电波段具有弥散辐射的大质量星系团以及纤维状的宇宙大尺度机构，在形态上与宇宙再电离背景的观测尺度类似，分布比较复杂，呈非高斯分布，所以很难通过高斯函数进行精确的拟合。根据 MWA GLEAM[51, 52] 在低频波段 70 ～ 230 MHz 的巡天结果，探测到了 200 余个射电源具有大尺度的弥散结构。随着望远镜性能的提高和数据处理方法的完善，更多具有弥散辐射的射电源将会被探测到。这些具有弥散结构的射电源可以分为射电晕、微射电晕和射电遗迹。由于其陡谱的性质，在低频波段呈现出更强的辐射，因此在宇宙黎明和再电离探测的频率范围内，弥散射电源的影响是不能被忽视的。尽管相对于银河系前景，星系团星系际介质射电展源的辐射较弱，但仍比宇宙黎明和再电离时期的 HI 21 cm 信号强 2 ～ 3 个数量级[50] (如图 2 所示)。

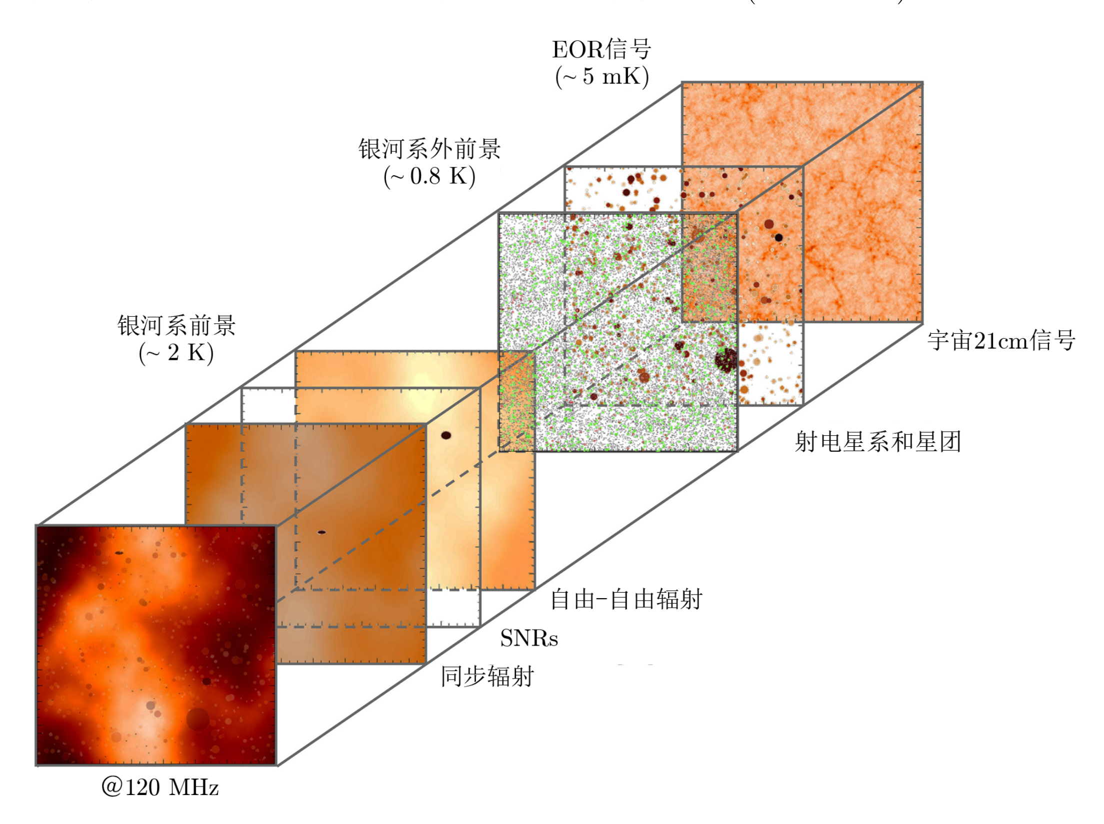


图 2　120 MHz 低频波段的宇宙再电离 21 cm 信号及各类前景示意图[50]

目前弥散源拟合方法包括多高斯函数拟合、shapelets 等。shapelets 是一系列由加权 Hermite 多项式组成的正交基函数[53]。shapelets 已在许多天文应用中使用，包括模拟尘埃的三维分布[54]、在射电图像模拟中的弱引力透镜测量[55]、引力透镜图像[56]等。在宇宙黎明

和再电离探测中，不仅需要在像空间进行前景成分的拟合和去除，还需要在 UV 空间对非格点化的数据进行操作，直接进行功率谱的提取。因此，目前弥散源的拟合仍然是宇宙黎明和再电离探测的难点。

2.3 数据处理

由于宇宙黎明和再电离信号非常微弱，因此在观测和数据处理的各个环节都有很高的要求。目前的 SKA 探路者望远镜由于受到灵敏度和分辨率的限制，在宇宙黎明和再电离探测方面主要致力于统计测量，而未来的 SKA 则同时具备统计测量和成像的能力。然而随着 SKA 灵敏度和分辨率的提高，为满足宇宙黎明和再电离信号探测需求所需采集的数据量的增大，大视场、带宽、高分辨率以及多波束技术，对硬件和软件都提出了更高和更具挑战性的要求。

在低频射电波段进行探测所面临的主要问题之一是干扰去除问题。随着科技的发展，射电干扰是目前低频射电探测的主要困难之一，射电宁静区域非常稀少。因此，射频干扰信号的识别和去除在低频射电数据处理中非常关键。低频射电干扰分为不同类型，如出现在某个特定频率的强干扰，一般来源是电视基站、卫星信号、飞机、雷达等；出现在某个特定时间的频率覆盖范围较宽的射电干扰，如闪电、高压电缆等。对于这些射电干扰并没有统一的方法来进行扣除，尤其在面临大量数据处理时，需要更为有效的自动识别和去除干扰的方法。目前能够对观测数据进行自动干扰信号识别和去除的方法包括对 RFI 自动化处理的软件包 AOFLAGGER[57], FLAGCAL[58] 等。AOFLAGGER 是 LOFAR 去除 RFI 默认的检测管道，是在时频空间对信号进行拟合，准确率差不多与人眼效果相当。GMRT 主要用 FLAGCAL 进行射电干涉测量数据的 RFI 标记和校准，尽管在本质上与其他算法相似，但 FLAGCAL 拥有强大的估算系统，并且可以做到高性能计算和并行计算。

数据校准也是数据处理中的重要步骤之一。在对干涉阵列进行数据处理的过程中，只有对观测数据进行校准才能获得有科学价值的观测结果。校准是为了对仪器效应以及电离层影响进行去除，从而对观测的射电源进行流量和位置的改正。在进行大视场成像时，源于射电源的信号会随方向、时间和频率发生变化，尤其对于大视场成像而言，对于不同的观测方向和时间进行校准非常关键。数据校准过程分为幅度校准和相位校准，即拟合一个复数的增益因子对每一个接收单元进行改正，对观测视场内的射电源进行位置和亮度的校准。在校准过程中，可以使用天线的波束模型、射电源天空模型或者特定的校准源进行数据校准。在实际观测中，精准的天线波束模型的建立和天空模型的建立都存在困难，因此校准过程的误差也会传递到最终的宇宙黎明和再电离信号提取的过程中。

CLEAN 是目前普遍使用的成像方法之一。基于目前低频望远镜阵列数据处理的需求，目前开发出的成像软件包包括 WSCLEAN (w-Stacking Clean) 等，这些软件包都具备大视场成像中 w 项的改正功能。WSCLEAN[59] 是用 C++ 语言编写的，使用 C++ 11 标准库的线程模块可以对多个步骤进行多线程处理：读和写、不同 w 项之间的网格化、 执行 FFTs 以及 Högbom Clean[60] 迭代。WSCLEAN 当前使用 Kaiser-Bessel (KB) 窗口函数，该函数易于计算且快速，非常类似于 PSWF (the prolate spheroidal wave function)[61]。

在宇宙再电离探测中，目前存在的数据校准和功率谱计算软件主要包括 the fast holographic deconvolution (FHD), εppsilon, the cosmological HI power spectrum estimator (CHIPS) 等。FHD/εppsilon 功率谱分析[62]在研究中很普遍，包括 MWA Phase I[32], MWA PhaseII[63], PAPER[64]以及在计划中的 HERA 的数据处理，也可用于仿真数据[65]。FHD/εppsilon 结合对光谱的精确校准，以及端到端数据匹配的模型仿真和误差传递，非常适合宇宙再电离信号的测量、数据处理和研究。CHIPS[66]是 MWA EoR 使用的信号处理管线之一，用于获取校准后的数据并将其处理为输出功率谱。全部热噪声加上残余前景信号的逆协方差加权是提取信号统计信息的最佳方法，但这存在一定程度的困难[67]。残差前景模型不恰当，以及无法完全独立地了解其内部协方差和与信号的协方差，容易导致信号丢失[68]。因此，CHIPS 在整个工作中主要被用作逆方差估计量，其中基线权重用于采样。

测量高红移 HI 信号所处的波段是低频波段 50 ~ 200 MHz，比起其他较高的观测频率，这一波段存在的人为干扰较多，去除和识别起来比较困难。由于前景射电源幂律谱的特性，辐射在低频波段更强，也造成了更强的前景污染。并且，目前低频观测图像的分辨率和图像质量低于其他波段，造成了前景射电源精确识别的限制和建立精确前景模型的限制，而数据校准是基于前景模型展开的，应用其他波段的观测依照幂律性质建立的前景模型并不完全准确，误差会造成数据校准的困难。同时，在低频波段的电离层影响会引起射电源位置和亮度的变化，在分辨率受限的情况下，校准也存在困难。

在宇宙再电离功率谱探测的过程中，最理想的处理方式是使用原始的观测数据直接构造功率谱，避免格点化问题引起的误差。然而低频射电阵列原始观测的数据量巨大。另外为达到提取微弱信号的需求，需要进行长时间的数据积累。并且要完成对原始数据的校准，对计算和存储有很大需求。因此在宇宙再电离探测的数据处理中面临着海量数据处理的问题。

未来SKA将采用深场定点观测模式和巡天模式来完成对宇宙黎明和再电离时期深场成像和统计测量工作。大天区的成像涉及到 w 项改正以及图像拼接的问题，同时要保证提取信号所需的高动态范围。因此大视场成像也是数据处理中的难点之一。

3 宇宙黎明和再电离时期探测进展

在过去 10 年间国际上已经有许多低频探测设备建成，人们利用这些探测设备在宇宙黎明和再电离探测领域取得了研究进展。

3.1 全天总功率测量

宇宙黎明和再电离时期的全天总功率测量通常是由单天线完成，测量方法类似于宇宙微波背景辐射测量。目前国际上的相关实验包括 EDGES, BIGHORN, SCI-HI, LEDA, SARAS, DARE, PRI^{Z}M, ASSASSIN, DAPPER 和 DSL 等。

EDGES[69]实验位于澳大利亚西部，旨在测量再电离信号的全天总功率，它采用了一种特定的方法研究预期的频谱差异，以克服前景和信号分离上的困难，这种方法是限制实验范围以测试光谱中的不连续特征，因为这些特征必定是由于红移 21 cm 谱线亮温度的快速跃

迁而不是较平滑的前景。2010 年，Bownman 和 Rogers[11]率先对宇宙再电离时标进行了约束；2018 年，Bownman 和 Rogers[12]发表了其在低频波段全天总功率探测的实验结果，经过数据校准，前景去除等数据处理过程，在 78 MHz 附近检测到一个吸收谷，提取出疑似宇宙黎明时期的 HI 21 cm 辐射的吸收信号；2017 年，Monsalve 等人[14]通过高频段天线数据，对宇宙再电离模型进行了约束。BIGHORN 特点是便捷、简单、低功耗，可自由选择试验地点，2018 年，Choudhury 和 Datta[13]提出由 artificial neural networks (ANN) 从明亮的银河系前景中探测 21 cm 全天信号 (以“tanh”模型的形式表示)，获得初步结果，发现即使存在由三阶或更高阶对数多项式表示的明亮前景，也可以准确确定全天 21 cm 信号参数。SCI-HI[16]用 4.4 h 的数据，通过多项式扣除前景，在 60~88 MHz 范围内给出了 1 K 均方根残差的限值。LEDA[17]用 19 min 的有效测量数据，对 50~100 MHz 之间的吸收槽进行了限制。SARAS 位于印度，是一个单天线相关频谱仪，Patra 等人[20]提供了 110~175 MHz 波段射电频谱的绝对天空亮度和谱指数，并对 150 MHz 全天图提供了更精确的校准。SARAS 2[21]实验排除了 Cohen 等人[70]模拟的几个再电离时期全天 21 cm 信号模型。地面的这些实验，虽然都选择了人烟稀少、电磁环境优良的测量地点，但在一定程度上仍受到人为电磁干扰的影响，并且也会受到地球电离层吸收、折射的影响，如果能在太空进行观测，特别是利用月球遮挡来自地球的电磁干扰，将大大提升实验的灵敏度和可靠性，美国为此提出了 DARE 实验，DARE 太空计划打算从月球远端上方的轨道测量全天 21 cm 信号[23]，通过它在黑暗时期末和宇宙黎明期间对银河系星际介质的影响，来追踪第一代发光天体的形成，DARE 绕月球飞行的任务为期 3 年，并从月球上方获取数据，这是太阳系中唯一经证实不受射频干扰和任何重要电离层影响的位置。PRI^{Z}M 是测量全天平均天空亮度的新实验，其中包括由第一代恒星形成引起的预期的红移 21 cm HI 吸收特征，PRI^{Z}M 由两个双极化天线组成，工作的中心频率分别为 70 MHz 和 100 MHz，该实验位于亚南极的马里恩岛上，马里恩岛拥有异常干净的观测环境，FM 频段内基本上没有可见的污染。ASSASSIN 旨在探索宇宙黎明到再电离时期结束这一阶段的红移 21 cm 信号。DAPPER 主要是研究早期宇宙的黑暗时期，是一项绕月轨道实验，这艘飞船将使用专门的接收器和高频天线来监听来自早期宇宙的微弱信号，要做到这一点需要一个非常安静的环境，而月球的背面是一个理想的地方。2014 年，中欧联合团队提出了 DSL 计划，对超长波天文观测阵列方案开展了系统研究，主要是月球轨道上的线性阵列，同时对天空进行干涉测量，可以合成绘制整个天空的高分辨率图像以及全天射电频谱，研究低频射电源、银河系星际介质等。全天总功率测量实验详细的信息及进展情况如表 1 所示。

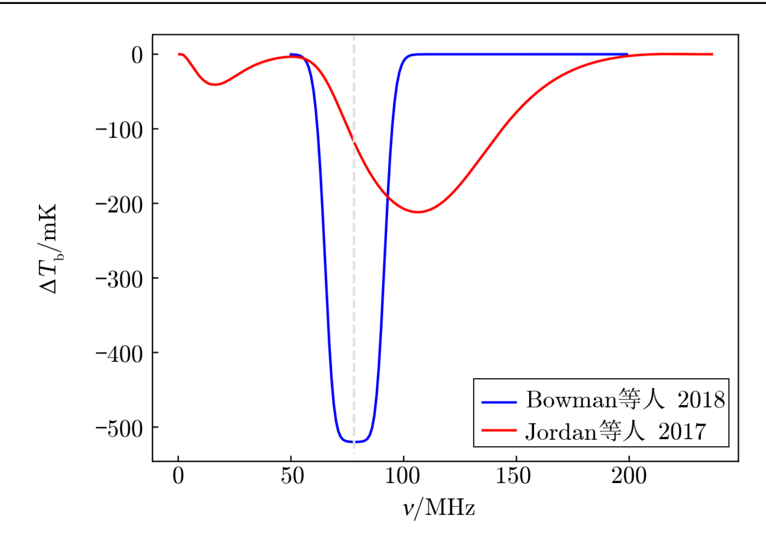
目前的 SKA 探路者阵列，一般采取定点观测和巡天观测两种模式。相对于 LOFAR，MWA 等采用定点观测和巡天观测模式的阵列，中国的 21CMA 阵列的天线是单一指向天线，视场是北天极区域，优势是可以全天指向北天极区域实现长时间的数据积累，缺点是受到了观测天区的限制，在定标源选取上和展源的去除上会遇到困难。

针对全天 21 cm 信号，2017 年 Jordan 等人[71]利用星系和暗晕的丰度匹配建立了一个新模型，把 21 cm 信号和高红移星系光度函数联系起来。该模型已针对高红移星系光度函数的测量进行了校准，并进一步调整以匹配宇宙微波背景汤姆逊散射的光深。模型在 110 MHz

表 1　全天总功率测量实验

实验名称	频率 f /MHz	红移 z	结果	参考文献
EDGES	50～100 和 100～200	6.5～14.8 和 13.2～27.4	对宇宙再电离时标、模型进行了约束，提出疑似宇宙黎明信号。	[10–15]
BIGHORN	20～160	7.9～70	由 ANN 从明亮的银河系前景中探测 21 cm 全天信号 (以“tanh”模型的形式表示)。	[13]
SCI-HI	40～130	9.9～34.5	用 4.4 h 的数据，通过多项式扣除前景，在 60～88 MHz 范围内给出了 1 K 均方根残差的限值。	[16]
LEDA	50～100	13.2～27.4	用 19 min 的有效测量数据，对 50～100 MHz 之间的吸收槽进行了限制。	[17, 18]
SARAS	87.5～175	7.1～15.2	SARAS 提供了 110～175 MHz 波段的绝对天空亮度和谱指数；SARAS 2 排除了 Cohen 等人模拟的几个再电离时期全天 21 cm 信号模型。	[19–21]
DARE	40～120	10.8～34.5	计划从月球远端上方的轨道测量全天 21 cm 信号。	[22, 23]
PRI^{Z}M	70 和 100		描述了其最初的设计和配置，在极宁静的射电场演示了全天 21 cm 探测设备的运行情况。	[24]
ASSASSIN	50～200	6.1～27.4	采用了紧密排列的天线阵列而不是使用传统方法使用单个天线来测量。用仿真演示了最新开发的方法，并表明对于理想化的仪器，理论上可以从紧密间隔的偶极子阵列的可见性中提取 21 cm 的信号。	[25]
DAPPER	17～38	36～83	将测量 21 cm 光谱的幅度，使其达到区分 ($>5\sigma$) 标准宇宙学模型与其他标准宇宙模型所需的水平。	[26]
DSL	30～100	13.2～46	这个项目的主要目标是使用卫星星座作为干涉阵列来绘制 30 MHz 以下的天空谱；另一个目标是在感兴趣的频率范围内进行高精度的全天频谱测量，以研究黑暗时期和宇宙黎明，因为不受地面观测中的电离层干扰和射频干扰。	[27]

处吸收达到峰值。若不引入新物理模型，无法解释 EDGES 测量到的疑似信号。如图 3 所示。相较之下，EDGES 得到的全天信号[12]的确存在一个吸收谷，这符合再电离时期前的冷 IGM 模型，但同时也有一些新的特征，如：信号的吸收峰值达到了约 0.5 K，这远远超出了此前的预测；峰值频率在 78 MHz，亦即更高的红移。2018 年，Jordan 等人[72]对此差异给出解释：(1) 吸收峰值的提前可能源自于高红移矮星系恒星形成效率的提高，从而导致 Wouthuysen-Field 效应和 X 射线加热的提前；(2) 建立一个热历史演化的参数模型，提供 IGM 新的冷却途径，来拟合 EDGES 的深吸收谷；(3) 观测到深吸收谷也说明，除了宇宙背景辐射以外，可能还存在新的射电背景如恒星形成星系提供的射电源，利用已有恒星形成速率与射电光度的经验关系，可以对 EDGES 观测做出拟合。



注：图中红线为 Jordan 等人[71]针对全天 21 cm 信号建立的新模型，可以为 21 cm 信号和高红移星系光度函数建立联系。蓝色表示基于 Bownman 和 Rogers[12]的观测结果的拟合结果 (Flatten Gaussian)，在 78 MHz 附近检测到一个吸收谷 (浅灰色虚线)，疑似宇宙黎明时期信号。

图 3 针对 21 cm 信号建立的模型

3.2 功率谱测量

目前国际上的 SKA 探路者低频射电阵列，如 21CMA, MWA, LOFAR, GMRT, PAPER, HERA 等，都将宇宙黎明和再电离时期的功率谱测量作为首要科学目标之一。宇宙黎明和再电离时期的功率谱测量分为两个方向：通过去除射电前景污染，构建宇宙再电离背景信号的功率谱；直接构建功率谱，通过在功率谱空间研究宇宙再电离信号的探测窗口，避免仪器效应和前景污染的区域，直接提取宇宙再电离时期信号。近年来，基于这些低频射电阵列的观测数据，在统计测量方面已经进行了大量的研究工作，如表 2 所示。

表 2 功率谱统计测量实验 (表中仅罗列出已有测量结果的实验)

实验名称	频率 f /MHz	红移 z	尺度 k /(h·Mpc^{-1})	测量结果 /10^{-3}K^2	参考文献
MWA	175.3	7.1	0.27	$\Delta^2 \leqslant 2.7 \times 10^4$	[32]
	177.5	7.0	0.20	$\Delta^2 \leqslant 3.9 \times 10^3$	[31]
	189.3	6.5	0.59	$\Delta^2 \leqslant 2.39 \times 10^3$	[35]
	189.3	6.5	0.14	$(43\ \mathrm{mK})^2 = 1.8 \times 10^3$	[34]
LOFAR	127.9	10.1	≈ 0.053	$\Delta^2 \leqslant 79.6^2$	[38]
	≈140.6	≈ 9.1	0.075	$\Delta^2 \leqslant 73^2$	[37]
GMRT	147.9	8.6	0.5	$\Delta^2 \leqslant 248^2$	[30]
PAPER	151.1	8.4	0.15～0.5	$\Delta^2 \leqslant 22.4^2$	[39]
	151.5	8.37	0.37	$\Delta^2 \leqslant 200^2$	[40]

为进行前景射电源属性研究，建立精确的天空模型，目前基于低频射电阵列的观测数据，已经形成的射电源星表包括：21CMA 星表[29]、MWA GLEAM 星表[51]等。

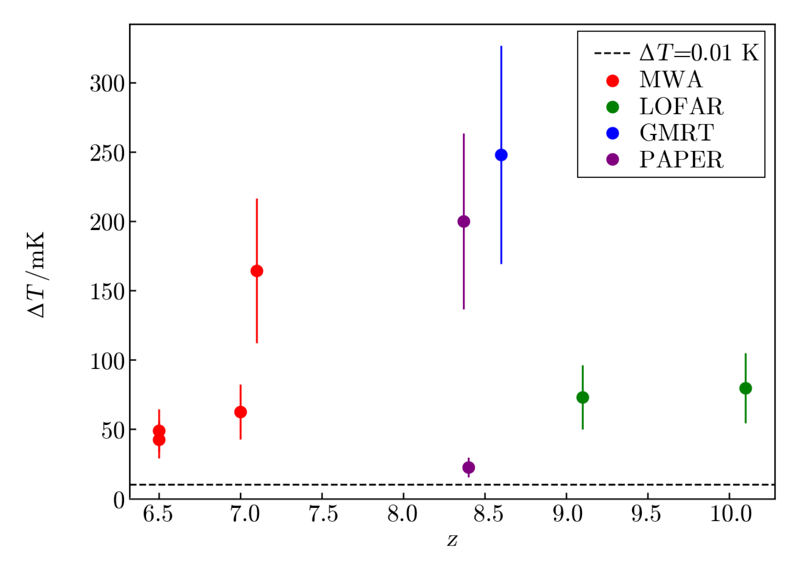
在功率谱测量方面，Procopio 等人[36]基于 MWA 的 GLEAM 巡天，为提高分辨率，结合 GMRT TGSS 巡天 150 MHz 的数据，为致密的前景源建立了一个模型，这种混合模型可以对 EoR1 (MWA EOR 实验的三个目标场之一，(RA, DEC) = (4 h, −30.0°)) 的数据进行重新处理，最大可提高 8% 的校准精度。利用该模型，Beardsley 等人[32]在 $k = 0.27\ h{\cdot}\mathrm{Mpc}^{-1}$，$z = 7.1$ 得到功率谱 $\Delta^2 \leqslant 27\ \mathrm{K}^2$；Barry 等人[31]在 $k = 0.2\ h{\cdot}\mathrm{Mpc}^{-1}$, $z = 7.0$ 得到 $\Delta^2 \leqslant 3.9\ \mathrm{K}^2$；Li 等人[35] 在 $k = 0.59\ h{\cdot}\mathrm{Mpc}^{-1}$, $z = 6.5$ 得到 $\Delta^2 \leqslant 2.39\ \mathrm{K}^2$；Trott 等人[34]根据 MWA EoR 项目的数据，通过实时系统的校准，以及 CHIPS 管线估算功率谱，在 $k = 0.07 \sim 3\ h{\cdot}\mathrm{Mpc}^{-1}$, $z = 6.5 \sim 8.7$ 计算出了平均功率谱；Byrne[33]提出了南部天空的全极化漫射图，并讨论了其用于改进 EoR 校准和前景去除的应用。Patil 等人[38]在 $k \approx 0.053\ h{\cdot}\mathrm{Mpc}^{-1}$, $z = 10.1$ 得到 $\Delta^2 \leqslant 79.6^2 \times 10^{-3}\mathrm{K}^2$；Mertens 等人[37]基于 LOFAR 测得的 141 h 的数据，获得了在 $z \approx 9.1$ 的红移下 21 cm 信号功率谱新的测量上限，这项研究在频谱平滑增益校准，高斯过程回归 (GPR) 前景缓解和最佳加权功率谱推断等方面都进行了重大改进；Bradley 等人[73]用 21CMMC 对 3D 宇宙 21 cm 信号进行正向建模，探索了与观测极限不同的天体物理参数空间区域。PAPER 项目组 Ali 等人[39]在 $k = 0.15 \sim 0.5\ h{\cdot}\mathrm{Mpc}^{-1}$, $z = 8.4$ 得到 $\Delta^2 \leqslant 22.4^2 \times 10^{-3}\mathrm{K}^2$；Cheng 等人[67]通过对其数据进行可靠的重新分析，改进了之前的测量结果；Kolopanis 等人[40]由 PAPER 的数据，给出了再电离时期 21 cm 功率谱的限制，该工作对数据处理管线中的基于延迟的前景滤波以及基于经验的协方差估计等步骤进行了改进，并且解决了 PAPER 先前的结果中的信号损失问题；Jacobs 等人[74]基于 PAPER 数据，发表了 145 MHz 频率的功率谱测量结果，该测量有望涵盖宇宙电离频段内的大部分信号源，在建立前景信号模型方面取得了进展。GMRT 目前也在进行高红移 HI 功率谱的测量工作，Paciga 等人[30]用奇异值分解 (SVD) 的方法来去除前景，对前景结构的假设条件引入较少。通过这种方法，他们还首次量化了由前景滤波器引起的信号损耗，并提出了针对该损耗调整的功率谱测量，从而得到了在 $k = 0.5\ h{\cdot}\mathrm{Mpc}^{-1}$，$z = 8.6$ 时的 2σ 上限的修正测量值 $\Delta^2 \leqslant 248^2 \times 10^{-3}\mathrm{K}^2$。

我们对低频射电阵列在宇宙黎明时期功率谱研究方面的最新探测结果与理论预测信号强度进行了比较，结果如图 4 所示。Matias 等人[75]根据理论模型得出 21 cm 信号的峰值在 0.01 K 左右，如图 4 中黑色虚线所示。

3.3　成像研究

未来的 SKA 低频阵列不仅能对宇宙再电离信号进行功率谱测量，还将具备对宇宙再电离信号进行成像研究的能力，完成低频射电干涉大视场、高动态、多波束的成像处理软件，将有助于揭开宇宙再电离的神秘面纱。与功率谱测量相比，对再电离时期的大尺度电离氢区进行直接成像观测，可以更为直接地提取电离区域的大小和特征等物理信息。对 5 个 20 平方度的天区进行深度成像观测也是未来 SKA 低频的首要科学目标之一。

SKA 是由全球超过 10 个国家合资建造的世界最大综合孔径射电望远镜阵列，台址位于澳大利亚、南非及南部非洲 8 个国家的射电宁静区域，由分布在 3 000 km 范围内的约 2 500



注：红色是 MWA，绿色是 LOFAR，蓝色是 GMRT，紫色是 PAPER。误差棒为 2σ。Matias 等人[75]根据理论模型得出 21 cm 信号的峰值在 0.01 K 左右，如黑色虚线所示。

图 4 功率谱测量结果汇总(与表 2 对应一致)

面 15 m 口径碟形高频天线、250 km 范围内的 250 个直径约 60 m 的致密孔径阵列 (中频) 以及 130 万个对数周期天线组成的稀疏孔径阵列 (低频) 组成，其等效接收面积达平方公里级，频率覆盖范围为 50 MHz ~ 20 GHz。SKA 分为建设准备阶段 (2012–2021 年)、建设第一阶段 (SKA1，2021–2028 年) 和建设第二阶段 (SKA2，2028 年后)。SKA 的首要科学目标之一就是利用 HI 21 cm 信号进行 EoR 成像观测，以及进行 CD/EoR 功率谱测量。与目前正在运行的 SKA 探路者项目相比，SKA1 低频阵列是唯一可实现 EoR 成像观测的实验装置，具有重大的历史意义。SKA 低频阵列的大面积巡天还可以统计测量红移 6 ~ 27 的 21 cm 信号功率谱，给出 HI 气体的三维分布，其峰值信噪比约为 100，波数 $k = (0.02 \sim 0.1)\ h{\cdot}\mathrm{Mpc}^{-1}$。未来，SKA2 将大大提高角分辨率和灵敏度，在更大的尺度范围内对 CD/EoR 进行更精确的测量。由于宇宙 21 cm 信号非常微弱，因此需要进行长时间的观测来降低噪音。利用 SKA 探路者低频射电阵列进行某些特定天区的深场观测，可以更好地了解前景的性质、仪器的影响，改善数据处理的方法等，同时也为准确地在二维功率谱空间限制宇宙再电离探测的窗口提供了可能性。这些对于在不久的将来使用 SKA 低频阵列探测宇宙再电离信号是至关重要的。SKA 预期在 100 ~ 200 MHz 获得第一幅宇宙再电离的直接图像，揭开宇宙再电离的奥秘，为了这一极富挑战性的观测，Zheng 等人[76]对现有的目录和频率范围内的观测进行了预选，选出适于宇宙黎明和再电离深度成像的“最安静”和“最干净”的候选天区。SKA1的基本参数概括在表 3 中。目前与 SKA 覆盖频段相似的射电望远镜的观测灵敏度对比如图 5 所示，图来自国际 SKA 组织 (SKA Organization, SKAO①)。

①https://www.skatelescope.org/key-documents/SKA Phase 1 Construction Proposal

表 3　SKA1 主要技术指标

参数	SKA1 - low	SKA1 - mid
频率范围/GHz	0.05 ~ 0.35	0.35 ~ 20
基准频率/GHz	0.11	1.67
灵敏度 $(A_{\rm eff}/T_{\rm sys})/({\rm m}^2{\cdot}{\rm K}^{-1})$ (基准频率)	550	1 500 (包括 MeerKAT)
视场/(°)^2 (基准频率)	14	0.33
最高分辨率/(″) (基准频率)	7	0.25
单元阵列主频范围/GHz	0.1 ~ 0.2	0.35 ~ 20
单元阵列尺寸/m	35	15
单元阵列数目	512 (规划)，476 (实施)	133 + 64 (MeerKAT)，130 (实施)
每单元阵列天线数	256	1
最长基线/km	65 (规划)，40 (实施)	154 (规划)，120 (实施)

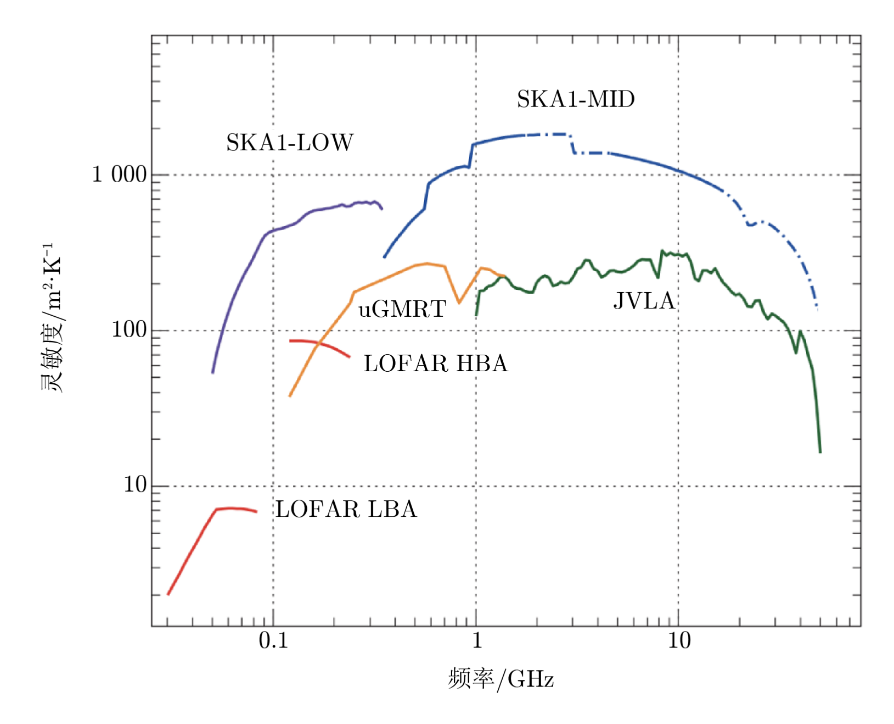


图 5　目前与 SKA 覆盖频段相似的射电望远镜的观测灵敏度 (来自 SKAO)

高动态大视场成像是未来 SKA 低频成像数据处理中面临的主要问题之一。为满足未来 SKA 大视场成像的运算需求，据估计，计算机硬件设施建设所产生的费用将在 SKA 低频预算中占有一半的比例。在处理未来 SKA 大视场成像的过程中，在校准、高动态、频率带宽、天线波束指向、主瓣边缘、电离层改正以及定标源选取等问题上，都存在困难与挑战。大视场范围内包含了大量的射电源以及来自仪器、大气层的影响，都随方向、时间、频率的变化而变化，因此对不同观测方向进行有效的校准显得极为重要。目前，基于剥离 (peeling)[77] 概念的校准方法是唯一有效的，但仍需继续开发从而降低成本并提高计算精度；

高质量的图像在宇宙黎明和再电离时期的数据分析和处理过程中起到很大的作用：建立模型、校准数据、提取再电离信号和去除前景源。对于 SKA 这类大视场望远镜，在成像过程中需要根据天线的不同指向进行相位的改正；给定的带宽情况下，积分时间决定了图像信噪比，积分时间的选择决定了亮的定标源在保证成像不被污染时它们之间的距离。

4 总结与展望

宇宙黎明和再电离时期的探测是通过测量 HI 超精细能级跃迁产生的 21 cm 信号来研究第一代发光天体的产生和形成过程。由于宇宙黎明和再电离时期的 HI 21 cm 信号非常微弱，因此在前景去除以及数据处理的各个环节中都存在着困难和挑战。宇宙黎明和再电离时期探测主要分三个方向：全天总功率测量、功率谱测量以及直接成像研究。全天总功率测量由单天线完成，功率谱测量和直接成像研究由低频射电阵列完成。低频射电阵列可以通过漂移扫描模式，进行浅度巡天，实现大视场成像，在 50 ~ 200 MHz 低频波段 (即红移范围 6 ~ 27) 统计获得宇宙黎明和再电离时期的 HI 功率谱。宇宙黎明和再电离时期的功率谱测量分为两个方向：通过去除射电前景污染，构建宇宙再电离背景信号的功率谱；直接构建功率谱，通过在功率谱空间研究宇宙再电离信号的探测窗口，避免仪器效应和前景污染的区域，直接提取宇宙再电离时期信号。功率谱测量是目前许多 SKA 低频探路者阵列的首要科学目标之一，由于受到灵敏度和分辨率的限制，目前的 SKA 探路者阵列不具备直接成像观测的能力。未来的 SKA 低频阵列将进行宇宙再电离时期功率谱测量和成像研究，具备对宇宙的再电离区域直接成图的能力。与功率谱测量相比，对再电离时期的大尺度电离氢区进行直接成像观测，可以更为直接地提取电离区域的大小和特征。本文主要讨论了在宇宙黎明和再电离时期探测中关于前景去除、数据处理方法等相关问题，以及低频射电望远镜在全天总功率测量、功率谱测量方面的研究进展。

低频射电阵列在灵敏度和分辨率上的提高，以及随着软件和硬件发展带来的数据处理水平的提高，使最终探测到宇宙黎明和再电离信号的可能性也不断增加。宇宙黎明和再电离时期探测对于理解宇宙中第一代发光天体是如何形成的和何时形成的，电离氢区的尺度和成团性等特征，宇宙再电离时期的关键物理过程，以及宇宙早期结构形成乃至整个星系的形成和演化历史都具有重要意义。对宇宙黎明和再电离信号的功率谱测量和成像研究，将揭示宇宙从黑暗走向光明的历史，以及宇宙结构形成从线性向非线性的演化进程。

参考文献：

[1] Castelvecchi D. Nature, 2019, 572: 298
[2] Madau P, Meiksin A, Rees M J, et al. ApJ, 1997, 475: 429
[3] Xu Y D, Chen X L, Fan Z, et al. ApJ, 2009, 704: 1396
[4] Xu Y D, Ferrara A, Chen X L, et al. MNRAS, 2011, 410: 2025

[5] Gunn J E, Peterson B A. ApJ, 1965, 142: 1633
[6] Carilli C L, Gnedin N Y, Owen F. ApJ, 2002, 577: 22
[7] Furlanetto S R, Abraham L. ApJ, 2002, 579: 1
[8] Furlanetto S R, Oh S P, Briggs F H. Physics Reports, 2006, 433: 181
[9] Zaldarriaga M, Furlanetto S R, Hernquist L. ApJ, 2004, 608: 622
[10] Bowman J D, Rogers A E E, Jacqueline N H. AIP, 2008, 1035: 87
[11] Bowman J D, Rogers A E E. Nature, 2010, 468: 796
[12] Bowman J D, Rogers A E E. Nature, 2018, 564: E35
[13] Choudhury M, Datta A. IAU, 2018, 333: 280
[14] Monsalve R A, Rogers A E E, Bowman J D, et al. ApJ, 2017, 835: 49
[15] Monsalve R A, Greig B, Bowman J D, et al. ApJ, 2018, 863: 11
[16] Tabitha C, Voytek, Aravind N, et al. ApJ, 2014, 782: 9
[17] Bernardi G, Zwart J T L, Price D, et al. MNRAS, 2016, 461: 3
[18] Greenhill L J, Kocz J, Barsdell B R, et al. Exascale Radio Astronomy, 2014, 46: 3
[19] Patra N, Subrahmanyan R, Raghunathan A, et al. ExA, 2013, 36: 319
[20] Patra N, Subrahmanyan R, Sethi S, et al. ApJ, 2015, 801: 138
[21] Singh S, Subrahmanyan R. ApJ, 2019, 880: 26
[22] Burns J O, Lazio J, Bale S, et al. AdSpR, 2012, 49: 433
[23] Burns J O, Bradley R, Tauscher K, et al. ApJ, 2017, 844: 33
[24] Philip L, Abdurashidova Z, Chiang H C, et al. JAI, 2019, 8: 1950004
[25] McKinley B, Trott C M, Sokolowski M, et al. MNRAS, 2020, 499: 52
[26] Burns J O, Bale S, Bradley R F, et al. American Astronomical Society Meeting, 2019, id. 212.02
[27] Chen X L, Burns J, Koopmans L, et al. http://www.issibj.ac.cn/Program/Forums/DiscoverSky/201808/t20180829_196751.html, arXiv:1907.10853
[28] Huang Y, Wu X P, Zheng Q, et al. RAA, 2016, 16: 36
[29] Zheng Q, Wu X P, Johnston H, et al. ApJ, 2016, 832: 190
[30] Paciga G, Albert J G, Bandura K, et al. MNRAS, 2013, 433, 639
[31] Barry N, Wilensky M, Trott C M, et al. ApJ, 2019, 884: 1
[32] Beardsley A P, Hazelton B J, Sullivan I S, et al. ApJ, 2016, 833: 102
[33] Byrne R. Bulletin of the American Astronomical Society, 2020, 52: 3
[34] Trott C M, Jordan C H, Midgley S, et al. MNRAS, 2020, 493: 4711
[35] Li W, Pober J C, Barry N, et al. ApJ, 2019, 887: 141
[36] Procopio P, Wayth R B, Line J, et al. PASA, 2017, 34: 33
[37] Mertens F G, Mevius M, Koopmans L V E, et al. MNRAS, 2020, 493: 1662
[38] Patil A H, Yatawatta S, Koopmans L V E, et al. ApJ, 2017, 838: 65
[39] Ali Z S, Parsonset A R, Zheng H X, et al. ApJ, 2015, 809: 61
[40] Kolopanis M, Jacobs D C, Cheng C, et al. ApJ, 2019, 883: 133
[41] DeBoer D R, Parsons A R. PASP, 2017, 129: 045001
[42] Mario G S, Asantha C, Lloyd K. ApJ, 2005, 625: 575
[43] Shaver P A, Windhorst R A, Madau P, et al. A&A, 1999, 345: 380
[44] Di M T, Perna R, Abel T, et al. ApJ, 2002, 564: 576
[45] Wang X, Tegmark M, Santos M G, et al. ApJ, 2006, 650: 529
[46] Zhang L, Karakci A. Sutter p M, et al. ApJS, 2016, 222: 3
[47] de Oliveira-Costa A, Tegmark M, Gaensler B M, et al. MNRAS, 2008, 388: 247
[48] Chang T, Pen U, Bandura K, et al. Nature, 2010, 466: 463
[49] Shaw J R, Sigurdson K, Pen U L, et al. ApJ, 2014, 781:57
[50] Zaroubi S. ASSL, 2013, 396: 45
[51] Hurley-Walker N, Callingham J R, Hancock P J, et al. MNRAS, 2017, 464: 1146
[52] Wayth R B, Lenc E, Bell M E, et al. PASA, 2015, 32: e025

[53] Refregier A. MNRAS, 2003, 338: 35
[54] Schechtman-Rook A, Bershady M A, Wood K, et al. ApJ, 2012, 746: 70
[55] Bacon D J, Rowe B, Patel P, et al. MNRAS, 2014, 444: 2893
[56] Tagore A S, Jackson N. MNRAS, 2016, 457: 3066
[57] Offringa A R, de Bruyn A G, Biehl M, et al. in Proc. Conf. RFI mitigation workshop, The Netherlands: PoS, 2010: 36
[58] Prasad J, Chengalur J. Experimental Astronomy, 2012, 33: 157
[59] Offringa A R, McKinley B, Hurley-Walker N, et al. MNRAS, 2014, 444: 606
[60] Högbom J A, Astronomy and Astrophysics Supplement, 1974, 15: 417
[61] Jackson J, Meyer C, Nishimura D, et al. IEEE Trans. on, 1991, 10: 473
[62] Barry N, Beardsley A P, Byrne R, et al. PASA, 2019, 10: 1017
[63] Li W, Pober J C, Hazeltonet B J, et al. ApJ, 2018, 863: 170
[64] Kerrigan J R, Jonathan C P, Ali Z S, et al. ApJ, 2018, 864: 131
[65] Barry N, Hazelton B, Sullivan I, et al. MNRAS, 2016, 461: 3135
[66] Trott C M, Pindor B, Procopio P, et al. ApJ, 2016, 818: 139
[67] Cheng C, Parsons A R, Kolopanis M, et al. ApJ, 2018, 868: 26
[68] Trott C M, Jordan C H, Midgley S, et al. MNRAS, 2020, 493: 4711
[69] Hills R, Kulkarni G, Meerburg P D, et al. Nature, 2018, 564: 7736
[70] Cohen A, Fialkov A, Barkana R, et al. MNRAS, 2017, 472: 1915
[71] Jordan M, Furlanetto S R, Sun G C, MNRAS, 2017, 464: 1365
[72] Jordan M, Furlanetto S R. MNRAS, 2018, 483: 1980
[73] Bradley G, Andrei M, Koopmans L V, et al. MNRAS, 2021, 501: 1
[74] Jacobs D C, Aguirre J E, Parsons A R, et al. ApJL, 2011, 734: L34
[75] Matias Z, Steven R F, Lars H. ApJ, 2008, 608: 622
[76] Zheng Q, Wu X P, Guo Q, et al. MNRAS, 2020, 499: 3434
[77] Mitchell D, Greenhill L, Wayth R, et al. IEEE, 2008, 2: 707

Progress on the Exploration of the Cosmic Dawn and the Epoch of Reionization

ZHAO Bi-xuan[1], ZHENG Qian[1,2], ZHANG Ze-kang[1,3], GUO Quan[1,2], SHAN Huan-yuan[1,2,3]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The cosmic dawn (CD) and epoch of reionization (EoR) are two of the most important missing pictures in the history of the Universe. The first luminous objects were formed during the CD/EoR period and thus marked the end of the dark ages. Detecting the redshifted 21cm hyperfine transition line of neutral hydrogen is regarded as the most promising and effective one to probe the CD/EoR. It includes three aspects: the total power measurement of the CD/EoR, the statistical measurement of the CD/EoR signal and

perform imaging observations on the reionization area directly. Recently, a lot of related works have been done on both theories and observations, including i) theories and numerical simulations on the IGM evolution history during EoR; ii) data processing methods including radio frequency interference (RFI) removal, data calibration, techniques of foregrounds removal, etc. It makes great progress on the global detections and statistic measurements of the CD/EoR signals. As the largest radio telescope ever built, the Square Kilometer Array (SKA) will enable us a better understanding of the history and morphology of the CD/EoR. This work will provide a brief overview of the related research progress of CD/EoR detection in recent years.

Key words: cosmology; the cosmic dawn and the epoch of reionization; radio interference array